

## 基于船舶领域的碰撞危险度评估模型

朱凯歌<sup>a, b</sup>, 史国友<sup>a, b</sup>, 汪琪<sup>a, b</sup>, 刘娇<sup>a, b</sup>

(大连海事大学 a. 航海学院; b. 辽宁省航海安全保障重点实验室 辽宁 大连 116026)

**摘要:** 为解决船舶避碰决策中对碰撞危险度计算精度不足和对危险目标船辨识性差的问题, 使用基于 Coldwell 船舶领域的危险识别参数改进多船避碰危险度评估模型, 比较改进前后模型的精度。使用 VC++ 实现船舶 MMG 运动模型, 对基于改进模型的四船交叉会遇态势作避碰决策仿真。仿真结果表明: 对同一危险船, 改进模型的精度更高; 在多船会遇中, 改进模型能够识别运动参数相似的危险目标船, 辨识性更高。改进模型可为更复杂的多船避碰决策提供理论支持。

**关键词:** 船舶领域; 碰撞危险度; 多船避碰; MMG 模型

中图分类号: U675.96

文献标志码: A

## Valuation model of ship collision risk based on ship domain

ZHU Kaige<sup>a, b</sup>, SHI Guoyou<sup>a, b</sup>, WANG Qi<sup>a, b</sup>, LIU Jiao<sup>a, b</sup>

(a. Navigation College; b. Key Laboratory of Navigation Safety Guarantee of Liaoning Province, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of insufficient accuracy of collision risk calculation and poor identification of dangerous target ships in ship collision avoidance decision-making, the multi-ship collision avoidance risk valuation model is improved using risk identification parameters based on the Coldwell ship domain, and the accuracy of the models before and after improvement is compared. VC++ is used to implement the ship MMG motion model, and the collision avoidance decision-making simulation on the four-ship crossing encounter situation based on the improved model is carried out. The simulation results show that: the improved model is of higher accuracy for the same dangerous ship; in multi-ship encounters, the improved model can identify dangerous target ships with similar motion parameters, which is of high identification. The improved model can provide theoretical support for more complex multi-ship collision avoidance decisions.

**Key words:** ship domain; collision risk; multi-ship collision avoidance; MMG model

收稿日期: 2019-03-11 修回日期: 2019-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(51579025); 辽宁省自然科学基金(20170540090)

作者简介: 朱凯歌(1994—)男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向为航海科学与技术 (E-mail) zkg@dlmu.edu.cn;

史国友(1968—)男, 安徽桐城人, 教授, 博导, 博士, 研究方向为船舶智能避碰 (E-mail) sgydmu@dlmu.edu.cn

<http://www.smujournal.cn>

[hyxb@shmtu.edu.cn](mailto:hyxb@shmtu.edu.cn)

## 0 引言

在海上船舶会遇态势中,使用雷达标绘结合最近会遇距离(distance of closest point of approach,DCPA)和最短会遇时间(time of closest point of approach, TCPA)(分别用 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 表示)计算船舶碰撞危险度有较强的可实施性。然而,随着海上船舶大型化的发展<sup>[1]</sup>,该方法的精度越来越不能满足航海需要,主要体现在未考虑目标船速度、航向的变化且在两船距离较近时未考虑船舶大小,导致对碰撞危险度计算延迟或精度不高,致使船舶避碰局面的代价函数精度低、误差大,进而使最终的多船避碰决策存在避让角度过大、避让时间较长等问题,失去参考价值。

对于此问题,国内外许多学者做了相关研究。COLDWELL<sup>[2]</sup>对港口船舶数据进行聚类分析,提出了存在偏移值的船舶领域,使船舶领域形状不再局限于圆形; LISOWSKI<sup>[3]</sup>使用最优控制和博弈论方法分析了船舶运动过程并提出了基于 $d_{CPA}$ 和 $t_{CPA}$ 的碰撞危险度计算公式,有效提高了避让代价函数的精度; SZLAPCZYNSKI等<sup>[4-5]</sup>等基于船舶领域提出了缩放领域的思想,改善了基于传统危险识别参数进行计算存在的忽视目标船参数的问题;刘冬冬等<sup>[6]</sup>提出了模糊四元船舶领域模糊评价模型,有效降低了避让代价函数的误差;高邈等<sup>[7]</sup>提出了数据压缩算法,可解决使用大量数据描绘船舶领域的精度问题;熊勇等<sup>[8]</sup>基于船舶动力学和船舶运动控制理论,使用速度障碍法结合运动基元理论生成避让方向,使避让航线具有实用性。

综合其他学者的研究成果,本文用基于Coldwell船舶领域的危险识别参数代替传统 $d_{CPA}$ 等参数,改进碰撞危险度评估模型,比较原模型与改进后模型在多船会遇态势下的计算精度;结合转向避让角度和危险度评估模型提出一种考虑船舶航行目的地的多船会遇态势下的避让代价函数;使用VC++MFC实现船舶MMG运动模型,对四船会遇态势下的船舶决策进行仿真验证;比较仿真结果并分析所提出的避让代价函数的实用意义。

## 1 模型设计

### 1.1 Coldwell 船舶领域

船舶领域用来描述船舶在保持安全航行状态下不受危险物侵犯的安全水域。图1为Coldwell船舶领域示意图,是通过限制水域多船运动轨迹数据

的拟合得到的近似几何图形。图1中: $L$ 为船长;领域长轴 $a$ 通常取 $12L$ ,领域短轴 $b$ 通常取 $5L$ ,可根据不同船舶类

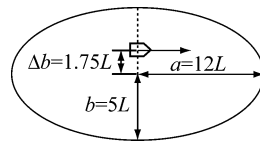


图1 Coldwell 船舶领域示意图

型或航行水域进行动态调整<sup>[9]</sup>;在传统近似椭圆领域的基础上添加了短轴的偏移值 $\Delta b$ ,通常取 $\Delta b = 1.75L$ <sup>[10]</sup>。

### 1.2 碰撞危险度评估模型

本文基于文献[3]提出碰撞危险度评估模型。该模型考虑两船间 $d_{CPA}$ 、 $t_{CPA}$ 和决策至操舵所需时间,并相应赋予权重系数描述会遇态势下的海上能见度、水域种类等因素。在多船会遇态势下,将本船与各目标船之间的碰撞危险度累加便可得到多船碰撞危险度,其模型具体形式为

$$r = \left( a_1 \left( \frac{d_{CPA}}{D_s} \right)^2 + a_2 \left( \frac{t_{CPA}}{T_s} \right)^2 + a_3 \left( \frac{D}{D_s} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $r$ 表示船舶碰撞危险度; $D_s$ 表示本船最小安全距离; $T_s$ 表示决策至操舵所需时间; $D$ 表示当前时刻两船距离; $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 为权重系数,取决于海上能见度、船舶尺寸(长度和宽度)和水域种类,通常取 $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ 。权重系数在不同会遇态势下可取不同值:若会遇船舶处于海上能见度差或其他需要考虑以避让距离为主的态势下,可适量取 $a_1 > 1$ ,如 $a_1 = 1.5$ 或 $a_1 = 2$ ;若会遇船舶因船舶尺寸等而转向慢或灵活性差,处于需要考虑以避让时间为主的态势下,可适量取 $a_2 > 1$ ;若会遇船舶在狭水道等复杂水域航行,处于需要考虑以船舶间安全距离为主的态势下,可适量取 $a_3 > 1$ 。

### 1.3 改进碰撞危险度评估模型

图2中,虚线椭圆为船 $S_1$ 的船舶领域经 $f$ 缩放因子放大至船 $S_2$ 刚好在领域边界时的船舶领域示意图。

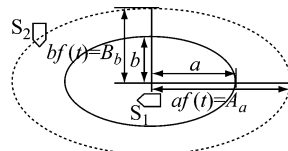


图2  $f$ 缩放因子示意图

首先明确基于船舶领域的危险识别参数的物理意义: $f$ 为把船舶领域长轴和短轴缩小或放大的比例 $f(t)$ 表示在 $t$ 时刻将安全领域缩小或放大至目标船刚好处于领域边界时的 $f$ 值,在图2中 $f(t) = B_b/b = A_a/a$ ;  $f_{min}$ 表示在两船保持当前状态航行的情景下,目标船距离本船最近时的 $f$ 值;  $T_{min}$ 表示在两船保持当前状态航行的情景下,从当前时刻到目标船侵入本船领域所需的时间。本文用 $f_{min}$ 表示 $d_{CPA}/D_s$ ,用 $T_{min}$ 表示 $t_{CPA}$ ,用 $f(t)$ 表示 $D/D_s$ ,用 $R_f$ 表示碰

撞危险度。 $f_{\min} < 1$  表示本船与目标船存在碰撞危险; $f_{\min} \geq 1$  表示两船不存在碰撞危险。综合可得

$$R_f = (a_1 f_{\min}^2 + a_2 (T_{\min}/T_s)^2 + a_3 f^2(t))^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

在实际应用中,当两船间的碰撞不可避免时可将碰撞危险度用 1 表示,当两船间不存在碰撞危险时可将碰撞危险度用 0 表示。也就是说,若两船间存在碰撞危险,只需本船减速或改向使  $R_f = 0$  即可。综合可得

$$R_f = \begin{cases} \min(R_f, 1), & f_{\min} < 1 \\ 0, & f_{\min} \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

#### 1.4 领域参数表示

对于碰撞危险识别参数的求取,可基于 Coldwell 船舶领域,引入对标准船舶安全领域几何缩放的思想,得出具体避让参数的推导表达式。如图 3 所示:船 A 为本船,其航向为  $\varphi$ ,航速为  $v_A$ ,坐标为  $(x_A, y_A)$ ,领域长轴长、短

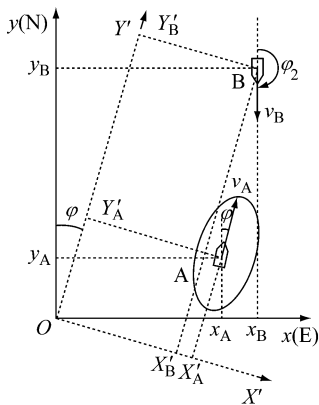


图3 船舶会遇参数标示图

轴长分别为  $a, b$ ; 船 B 为目标船,其航向为  $\varphi_2$ ,航速为  $v_B$ ,坐标为  $(x_B, y_B)$ 。

在本船艏向坐标系下,船舶领域中心点和目标船动态位置坐标分别用  $(X_S, Y_S)$  和  $(X'_B, Y'_B)$  表示,考虑  $f$  动态缩放因子,船舶领域动态方程为

$$\frac{(X'_B - X_S)^2}{b^2} + \frac{(Y'_B - Y_S)^2}{a^2} = f^2(t) \quad (4)$$

相应参数代入后可得

$$A_1 f^2(t) + (B_{11} + B_{12}t)f(t) + C_{11}t^2 + C_{12}t + C_{13} = 0 \quad (5)$$

式中:  $X_S, Y_S, X'_B, Y'_B, A_1, B_{11}, B_{12}, C_{11}, C_{12}$  和  $C_{13}$  的计算式可参照文献[11]。求解式(4)可得

$$f(t) = \frac{-(B_{11} + B_{12}t) \pm \sqrt{D_1 t^2 + E_1 t + F_1}}{2A_1} \quad (6)$$

其中  $D_1 = B_{12}^2 - 4A_1 C_{11}$ ,  $E_1 = 2B_{11}B_{12} - 4A_1 C_{12}$ ,  $F_1 = B_{11}^2 - 4A_1 C_{13}$ 。

为求  $f(t)$  的最小值,可对式(5)求导并令  $f'(t) = 0$ ,得

$$D_2 t^2 + E_2 t + F_2 = 0 \quad (7)$$

其中  $D_2 = D_1 (B_{12}^2 - D_1)$ ,  $E_2 = E_1 (B_{12}^2 - D_1)$ ,  $F_2 = F_1 B_{12}^2 - E_1^2/4$ 。求解式(7)可得

$$t_{\min} = \frac{-E_2 \pm \sqrt{E_2^2 - 4D_2 F_2}}{2D_2} \quad (8)$$

因此  $f(t)$  的最小值在  $t$  取  $t_{\min}$  时可得,且用  $f_{\min}$  表示,即  $f_{\min} = \min(f(t))$ 。

同理可得  $T_{\min}$  的解,当不考虑  $f$  缩放时,求解式(4)即可。若两解  $t_1, t_2$  一负一正,可理解为目标船在过去的  $t_1$  时刻入侵本船领域,在  $t_2$  时刻驶出本船领域;若  $t_1, t_2$  全为正值,可理解为目标船在  $t_1$  时刻入侵本船领域,在  $t_2$  时刻驶出本船领域。

## 2 模型比较

如图 4 所示,以真北上坐标系为参考系,船舶航向  $000^\circ$  为真北方向,顺时针方向为正。选取 8 艘目标船,分析各目标船与本船  $S_0$  在不同会遇态势下的碰撞危险度,比较改进前后

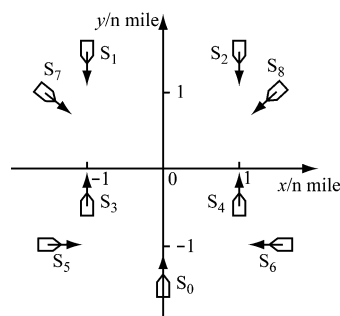


图4 船舶会遇态势标示图

碰撞危险识别参数的准确性与函数的实用性。

表 1 为各船运动状态参数表,其中:  $S_n$  表示第  $n$  艘船;  $v$  表示船舶速度, kn;  $\varphi$  表示船舶航向,  $(^\circ)$ ;  $(x, y)$  表示船舶坐标, n mile。表 2 给出了本船与各目标船间的碰撞危险识别参数和危险度,其中  $t_{CPA}$  和  $T_{\min}$  单位为 min,其他参数值均无量纲,式(2)中  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ 。

表1 各船运动状态参数

参数	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$
$v/\text{kn}$	8	8	8	6	6	8	8	8	8
$\varphi/(^\circ)$	0	180	180	0	0	90	270	130	230
$x/\text{n mile}$	0	-1	1	-1	1	-1.5	1.5	-1.5	1.5
$y/\text{n mile}$	-1.5	1.5	1.5	-0.5	-0.5	-1	-1	1	1

比较表 2 中  $t_{CPA}$  与  $T_{\min}$  可知,  $t_{CPA}$  通常大于  $T_{\min}$ 。如在本船  $S_0$  与目标船  $S_2$  会遇中,  $t_{CPA} = 11.25 \text{ min}$ ,  $T_{\min} = 8.42 \text{ min}$ 。由  $T_{\min}$  的定义可知,从当前时刻起,经过 8.42 min 目标船  $S_2$  开始进入本船领域,此时船  $S_2$  已经对本船  $S_0$  的安全产生威胁,若使用时间 11.25 min 衡量碰撞危险具有延迟性。因此,使用  $T_{\min}$  描述危险时间以及相应危险距离精度更高,且能够体现危险的紧迫性。

比较表 2 中  $d_{CPA}/D_S, t_{CPA}/D/D_S, r$  的值与  $f_{\min}, T_{\min}, f(t), R_f$  的值可知:当本船与目标船会遇时,利

表2 本船与各目标船间的碰撞危险识别参数和危险度

船舶	$d_{CPA}/D_S$	$t_{CPA}/\text{min}$	$D/D_S$	$r$	$f_{\min}$	$T_{\min}/\text{min}$	$f(t)$	$R_f$
$S_1$	1.00	11.25	3.16	0.023	1.90		2.92	0
$S_2$	1.00	11.25	3.16	0.023	0.91	8.42	1.93	0.37
$S_3$	1.00	30.00	1.41	0.023	1.90		2.05	0
$S_4$	1.00	30.00	1.41	0.023	0.91	7.34	1.06	0.49
$S_5$	0.71	7.50	1.58	0.033	0.65	7.62	2.87	0.30
$S_6$	0.71	7.50	1.58	0.033	0.48	3.06	1.40	0.63
$S_7$	0.30	11.20	2.92	0.074	0.41	9.74	3.42	0.25
$S_8$	0.30	11.20	2.92	0.074	0.24	6.24	1.94	0.43

用  $d_{CPA}/D_S$ 、 $t_{CPA}$ 、 $D/D_S$  处理左右对称局面(如目标船  $S_1$ 、 $S_2$  与本船  $S_0$  形成的局面,目标船  $S_3$ 、 $S_4$  与本船  $S_0$  形成的局面),得到的危险度相同;利用  $f_{\min}$ 、 $T_{\min}$ 、 $f(t)$  处理相同的左右对称局面,得到的危险度不同,且本船右方来船时的危险度大于左方来船时的危险度。比较  $r$  与  $R_f$  的值可知: $r$  的最大值为 0.074,最小值为 0.023,变化梯度为 0.051,对危险度的描述过于紧凑,变化不够明显; $R_f$  的最大值为 0.63,最小值为 0,变化梯度为 0.63,对危险度的描述更合理。由上可知改进后模型具有如下优势:在描述危险时间和危险距离方面精度更高;对右侧来船警惕性更强,体现了避碰规则的要求;其描述的危险度梯度变化明显,在实际应用中更容易观察。

### 3 仿真验证

#### 3.1 MMG 模型

本小节基于龙格-库塔(Runge-Kutta)法对船舶 MMG 运动方程求解,使用 Visual Studio 2015 MFC 编程实现仿真。龙格-库塔法目前广泛用于实际工程中,是具有高精度的显式或隐式迭代单步算法。本文选取经典四阶法(RK4)基于初值条件对船舶运动微分方程进行求解,简化计算过程。仿真实验中取步长 0.5,取真北向上坐标系为参考坐标系,所取船舶运动微分方程如下:

$$\begin{cases} \dot{u} = f_1(u, v, r, \delta, n) \\ \dot{v} = f_2(u, v, r, \delta, n) \\ \dot{r} = f_3(u, v, r, \delta, n) \\ \dot{\Psi} = r \\ \dot{x} = u \cos \Psi - v \sin \Psi \\ \dot{y} = u \sin \Psi + v \cos \Psi \\ \dot{n} = (n_E - n) / 2 \\ \dot{\xi} = (\xi_E - \xi) / 2.5 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $u$ 、 $v$  分别为两坐标轴方向上的分速度; $r$  为艏摇角速度; $\Psi$  为船艏向; $\xi$  为舵角; $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\dot{r}$ 、 $\dot{\Psi}$ 、 $\dot{\xi}$  分别表示相应变量对时间的微分; $n_E$  和  $\xi_E$  分别表示主机额定转速和主机舵角;所涉及的其他变量的物理意义可参考文献[11-12]。船舶右旋回仿真如图 5 所示。

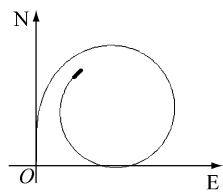


图5 船舶右旋回仿真

#### 3.2 四船交叉会遇态势仿真

##### 3.2.1 条件假设

本小节基于改进后的碰撞危险度评估模型,对四船交叉会遇态势进行决策仿真。仿真目的:验证改进后模型的危险辨识性,即在具体会遇态势下辨识最危险目标船的能力。船舶间存在碰撞危险的条件为  $R_f > 0$  且两船距离  $d < 3$  n mile;两船间不存在碰撞危险的条件为  $R_f = 0$  或两船距离  $d \geq 3$  n mile。驶过让清后可根据船舶性能采取相应措施<sup>[13]</sup>航行至计划航线即可。仿真过程作如下假设:(1)船舶间选择协调避让;(2)已知目标船运动参数;(3)所有船舶能够通过建立通信等方式获取目标船决策信息。

##### 3.2.2 实验结果

图 6 为船舶避碰决策流程,其中: $R_{f_1}$ 、 $R_{f_2}$ 、 $\dots$ 、 $R_{f_n}$  表示本船与船  $i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 间的碰撞危险度; $\delta_{\min}$  和  $\delta_{\max}$  分别表示本船在具体会遇态势下可实施的最小和最大转向角,其中  $\delta_{\max}$  由船舶性能决定; $\delta$  表示决策转向角; $\Delta\varphi$ 、 $\Delta\varphi_{\min}$ 、 $\Delta\varphi_{\max}$  为计算中间变量;式(2)中  $\mu_1 = a_2 = a_3 = 1$ 。

图 7 为四船协调避碰仿真图:共有 A、B、C、D 4 艘船,航行路线分别为  $A_1-A_2-A_3$ 、 $B_1-B_2-B_3$ 、 $C_1-C_2-C_3$  和  $D_1-D_2-D_3$ ,运动起始点坐标分别为  $(-2, 2)$ 、 $(2, 2)$ 、 $(-2, -2)$  和  $(2, -2)$ ,单位为 n mile,初始航向分别为  $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $315^\circ$ ,其

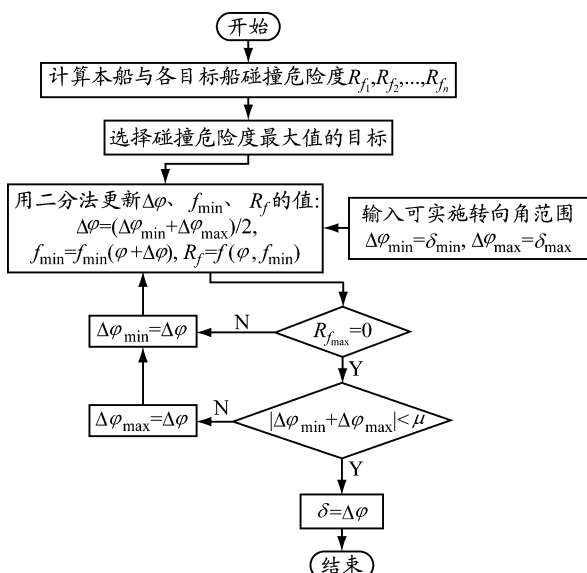


图6 船舶避碰决策流程

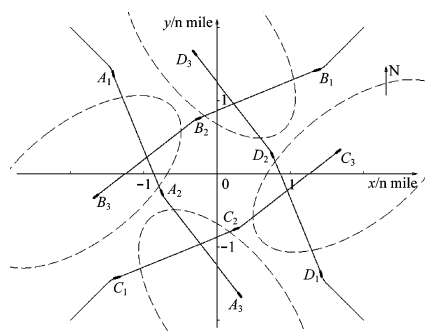


图7 四船协调避碰仿真图

中真北方向为  $000^\circ$ ; 4 艘船航速均为 8 kn, 船长均取 300 m; 本船最小安全距离  $D_s$  取 1 n mile, 决策至操舵所需时间  $T_s$  取 5 min。

基于改进前模型的船 A 在  $A_0$  (船舶运动起始点) 和  $A_1$  位置所对应的危险识别参数和对船 B、C、D 的危险度辨识值见表 3。基于改进后模型的船 A 在各位置的危险度辨别值和决策转向角见表 4: 如其中的 0.178 表示当船 A 处于  $A_1$  位置、船 B 处于  $B_1$  位置时, 船 B 对船 A 的危险度辨识值;  $\delta$  表示船 A 在各位置采取的转向角。

表3 基于改进前模型的船 A 在  $A_0$  和  $A_1$  位置所对应的危险识别参数和对船 B、C、D 的危险度辨识值

参数	$A_0$ -B	$A_0$ -C	$A_0$ -D	$A_1$ -B	$A_1$ -C	$A_1$ -D
$d_{CPA}$ / n mile	0	0	0	0	0	0
$t_{CPA}$ / min	21.21	21.21	21.21	15.90	15.90	15.90
$D$ / n mile	4.00	4.00	5.66	3.00	3.00	4.24
$r$	0.17	0.17	0.14	0.23	0.23	0.19

由实验设计可知, 对于船 A 来说, 船 B 与船 C 为空间对称船舶。由表 3 可知: 船 A 在  $A_0$  位置时,

表4 基于改进后模型的船 A 各位置危险度辨识值和决策转向角

船 A 位置	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
B	0.148	0.178	0	0
C	0.242	0.284	0	0
D	0.206	0.229	0	0
$\delta / (^\circ)$	0	30(右)	15(左)	0

改进前模型对船 B、船 C 的危险度辨识值均为 0.17, 对船 D 的危险度辨识值为 0.14; 船 A 在  $A_1$  位置时, 改进前模型对船 B、船 C 的危险度辨识值均为 0.23, 对船 D 的危险度辨识值为 0.19。因此, 改进前的危险度评估模型在船 A 处于  $A_0$  或  $A_1$  位置时, 能够区分出船 B、船 C 的危险度高于船 D, 但不具有区分出船 B 与船 C 的危险度的能力, 即不具有区分出空间对称船舶的危险度的能力。

由表 4 可知, 船 A 在  $A_0$  位置时: 各船之间距离大于 3 n mile, 不需要采取避让措施; 改进后模型对船 B、船 C 的危险度辨识值分别为 0.148 和 0.242, 对船 D 的危险度辨识值为 0.206, 说明能够区分出空间对称船舶的危险度; 船 C 危险度最大, 船 B 危险度最小, 因而从空间分布看, 改进后模型会优先考虑右侧来船。船 A 在  $A_1$  位置时, 改进后模型对船 B、船 C 的危险度辨识值分别为 0.178 和 0.284, 最大碰撞危险来自船 C, 且此时 A、C 两船距离等于 3 n mile, 因此对船 C 采取避碰决策, 操舵右转  $30^\circ$ 。船 A 在  $A_2$  时, 两船间碰撞危险度为 0, 可采取措施航行到计划航线。

总之, 改进后模型具有区分空间对称船舶的危险度的能力, 因而辨识性更高。改进后模型通过辨别左右来船危险度, 对右侧来船警惕性更大, 更符合避碰规则的要求。

## 4 结束语

本文通过引入 Coldwell 船舶领域的危险识别参数改进了碰撞危险度评估模型。通过比较得出, 改进后模型对具体会遇态势危险度量更精确。对具有对称性分布的四船交叉会遇态势的仿真结果表明, 改进后模型具有识别运动参数相似的危险目标船的能力, 辨识性更高, 且对右侧来船警惕性更大, 使避碰决策更具有安全性。改进后模型具有精度高、辨识性高的特点, 更适用于复杂水域船舶航行的避碰决策和开阔水域的多船避碰决策, 且可解决基于聚类算法对船舶会遇识别研究中会遇态势准确划分难的问题<sup>[14]</sup>。(下转第 57 页)

- [6] SAGHIRI S, WILDING R, MENA C, *et al.* Toward a three-dimensional framework for omni-channel [J]. *Journal of Business Research*, 2017, 77: 53-67. DOI: 10.1016/j.jbusres.2017.03.025.
- [7] 刘煜, 刘遗志, 汤定娜. 互联网时代零售企业构建全渠道商业模式的探讨[J]. *北京工商大学学报(社会科学版)*, 2016, 31(6): 34-42. DOI: 10.16299/j.1009-6116.2016.06.005.
- [8] PIOTROWICE W, CUTHBERTSON R. Introduction to the special issue: information technology in retail: toward omni-channel retailing [J]. *International Journal of Electronic Commerce*, 2014, 18(4): 5-16. DOI: 10.2753/JEC1086-4415180400.
- [9] 计国君, 余木红, KIM H T. 大数据驱动下的全渠道供应链服务创新决策框架[J]. *商业研究*, 2016(8): 152-162. DOI: 10.13902/j.cnki.syyj.2016.08.019.
- [10] 黄漫宇, 李圆颖. 零售企业全渠道发展水平对经营效率的影响路径及效应研究[J]. *北京工商大学学报(社会科学版)*, 2017, 32(6): 35-44. DOI: 10.16299/j.1009-6116.2017.06.005.
- [11] ABDULKADER M M S, GAJPAL Y, MEKKAWY T Y. Vehicle routing problem in omni-channel retailing distribution systems [J]. *International Journal of Production Economics*, 2018, 196: 43-55. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.11.011.
- [12] 葛显龙, 许茂增, 王伟鑫. 多车型车辆路径问题的量子遗传算法研究[J]. *中国管理科学*, 2013, 21(1): 125-133.
- [13] 潘雯雯, 郭海湘, 周光勇, 等. 基于两阶段算法的需求可拆分多车型车辆路径问题[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(s1): 55-61.
- [14] MARKOV I, VARONE S, BIERLAIRE M. Integrating a hetero-geneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection VRP with intermediate facilities [J]. *Transportation Research Part B*, 2016, 84: 256-273. DOI: 10.1016/j.trb.2015.12.004.
- [15] KOÇ Ç, BEKTAŞ T, JABALI O, *et al.* The fleet size and mix location-routing problem with time windows: formulations and a heuristic algorithm [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 248(1): 33-51. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.06.082.
- [16] NACCACHE S, CÔTÉ J-F, COELHO L C. The multi-pickup and delivery problem with time windows [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(1): 353-362. DOI: 10.1016/j.ejor.2018.01.035.
- [17] SCHNEIDER M. The vehicle-routing problem with time windows and driver-specific times [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 250(1): 101-109. DOI: 10.1016/j.ejor.2015.09.015.
- [18] OZBAYGIN G, KARASAN O E, SAVELSBERGH M, *et al.* A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with roaming delivery locations [J]. *Transportation Research Part B*, 2017, 100: 115-137. DOI: 10.1016/j.trb.2017.02.003. (编辑 赵勉)

(上接第5页)

## 参考文献:

- [1] 吴兆麟. 无人驾驶船舶发展与航海教育对策[J]. *中国航海*, 2017, 40(4): 99-103.
- [2] COLDWELL T G. Marine traffic behavior in restricted waters [J]. *The Journal of Navigation*, 1983, 36(3): 431-444. DOI: 10.1017/S0373463300039783.
- [3] LISOWSKI J. Determining the optimal ship trajectory in collision situation [C]. IX Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Inżynieria Ruchu Morskiego, Świnoujście, 2001, 1: 192-201.
- [4] SZLAPCZYNSKI R. A unified measure of collision risk derived from the concept of ship domain [J]. *The Journal of Navigation*, 2006, 59(3): 447-490. DOI: 10.1017/S0373463306003833.
- [5] SZLAPCZYNSKI R, SZLAPCZYNSKA J. A simulative comparison of ship domains and their polygonal approximations [J]. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2015, 9(1): 135-141. DOI: 10.12716/1001.09.01.17.
- [6] 刘冬冬, 史国友, 李伟峰, 等. 基于最短避碰距离和碰撞危险度的避碰决策支持 [J]. *上海海事大学学报*, 2018, 39(1): 13-18. DOI: 10.13340/j.jsmu.2018.01.003.
- [7] 高邈, 史国友, 李伟峰. 改进的 Sliding Window 在线船舶 AIS 轨迹数据压缩算法 [J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(3): 218-227. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4637.2018.03.023.
- [8] 熊勇, 贺益雄, 黄立文. 基于速度障碍的多船自动避碰控制方法 [J]. *中国航海*, 2015, 38(3): 46-51.
- [9] 周丹, 郑中义. 基于小波分析的船舶领域与其影响因素变化关系 [J]. *中国航海*, 2017, 40(2): 56-59, 64.
- [10] 邵哲平, 周田瑞, 潘家财, 等. 基于 AIS 数据挖掘的受限水域船舶动态领域研究 [J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(5): 564-570. DOI: 10.12082/dqxxkx.2018.180187.
- [11] KIJIMA K, KATSUNO T, NAKIRI Y, *et al.* On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition [J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1990, 168: 141-148. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1990.168\_141.
- [12] 朱军, 庞永杰, 徐玉如. 规则波浪中舰船操纵运动计算 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, 25(1): 1-5.
- [13] 高邈, 史国友, 李伟峰, 等. 基于改进遗传算法的岛礁区航路规划模型 [J]. *上海海事大学学报*, 2017, 38(3): 7-11. DOI: 10.13340/j.jsmu.2017.03.002.
- [14] 甄荣, RIVEIRO Maria, 金永兴. 一种基于 DBSCAN 的船舶会遇实时识别方法 [J]. *上海海事大学学报*, 2018, 39(1): 1-5. DOI: 10.13340/j.jsmu.2018.01.001. (编辑 赵勉)